

University of Groningen

Bestemming

de Meijer, R.J.

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2005

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

de Meijer, R. J. (2005). *Bestemming: Terra Incognita*. Technische Universiteit Eindhoven.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Bestemming: Terra Incognita

Draaideurrede

6 september 2005-08-07

prof. dr. R.J. de Meijer

faculteit Technische Natuurkunde (TU/e)

faculteit Wiskunde en Natuurwetenschappen (RUG)

Pagina 2:

Uitgesproken te Groningen op 6 september 2005
bij zijn aanvaarding en afscheid van zijn ambt als bijzonder hoogleraar
in de Nucleaire Geofysica aan de Rijksuniversiteit te Groningen
en zijn afscheid als hoogleraar
in de Radioactiviteit in de Woon- en Leefomgeving
aan de Technische Universiteit te Eindhoven
door

Dr. R.J. de Meijer

*Mijnheer de Rector Magnificus
Leden van het College van Bestuur van de Rijksuniversiteit Groningen
Leden van het College van Bestuur van de Technische Universiteit Eindhoven
Leden van het bestuur van het Groninger Universiteitsfonds,
Dames en Heren,*

Deze rede staat oorspronkelijk in het licht van de aanvaarding van mijn ambt als bijzonder hoogleraar in de Nucleaire Geofysica aan de Rijksuniversiteit Groningen, ingesteld door het Groninger Universiteitsfonds op 1 februari 2004. Bij die aanvaarding werd mij verzocht een intreerede te houden. Bij navraag in maart 2004 bleek de eerst beschikbare datum 19 april 2005 te zijn, slechts drie maanden voor het bereiken van mijn 65^e verjaardag. Het was derhalve beter de datum van de rede uit te stellen tot vandaag en zo een 'draaideurrede' te houden, waarin de aanvaarding en het beëindigen van de taak van dit hoogleraarschap kan worden gecombineerd met het beëindigen van mijn taak als hoogleraar aan de Technische Universiteit Eindhoven, die ik van november 1992 tot mijn pensionering heb vervuld.

Vandaag wil ik u meenemen op een reis die per definitie niet kan eindigen. Immers, iedere keer dat het doel - Terra Incognita - bereikt dreigt te worden en een stuk van onze planeet bekend is geworden, moet de reis verder. Een taak die alleen kan worden volgehouden door de fascinatie en verwondering die het leven op en met onze Planeet Aarde met zich meebrengt.

Deze fascinatie en verwondering zijn ontstaan aan het einde van de vijftiger jaren gedurende mijn middelbare schooltijd in Hilversum. Ik werd gevoed door een, in mijn ogen van toen, hypocriete godsdienstleraar die mijn rebellie tegen gezag ongewild aanwakkerde, een inspirerende scheikundeleraar die ons aanmoedigde kritisch te zijn en eigen oplossingen voor vraagstukken te zoeken, en een aardrijkskundeleraar die een grote gedrevenheid en enthousiasme uitstraalde. Deze laatste voedde met zijn enthousiasme over de toen fel ter discussie staande hypothese van Alfred Wegner over de verschuiving van de continenten mijn belangstelling voor het waarom van die processen.

Het was voor mij duidelijk dat ik na mijn middelbare school geologie wilde studeren. Door een tragisch voorval wilden mijn ouders deze keuze niet honoreren. Oudere vrienden van hen hadden een zoon die als geoloog in Nieuw-Guinea op de locale menukaart belandde. Om mijn verzet tegen die blokkade te doorbreken, werd ik naar mijn buurman gestuurd. Mijn buurman was kort voor mijn eindexamen benoemd tot hoogleraar Natuurkunde aan de Technische Hogeschool Eindhoven. Na het bekijken van mijn cijferlijst adviseerde hij mij Natuurkunde te gaan studeren, met als argument dat dit een goed basisvak is waarna ik altijd nog later naar de Aardwetenschappen kon overstappen. Zoals u kunt concluderen, heb ik dat advies gevolgd en is mijn belangstelling voor de Aarde uiteindelijk toch weer boven komen drijven.

Vanwaar fascinatie?

We leven in een tijd waarin er nauwelijks nog een plek aan het aardoppervlak niet betreden is. Sinds eeuwen kijken we met steeds betere instrumenten omhoog om de ruimte waarin we leven beter in kaart te brengen en te begrijpen. In onze drang om grenzen te verleggen, hebben we sinds een halve eeuw de ruimte betreden met voertuigen die aan de zwaartekracht van onze planeet zijn onttrokken. Astronauten hebben de Maan betreden en instrumenten zijn op Mars, Venus en Titan, een maan van Saturnus, neergezet. Amerikanen slaan met een projectiel een krater in de komeet Tempel om meer over de oorspronkelijke samenstelling van ons zonnestelsel te weten te komen. De Hubble-telescoop stelt ons in staat gedetailleerde beelden van geëxplodeerde sterren zoals de Krab-nevel te geven. Dus u zult zich wellicht afvragen: waar ligt nu nog het onbekende?

Het antwoord op die vraag komt wellicht als een verrassing: ‘Onder onze voeten’. De diepste mijnen in onze Aarde zijn zo’n drie kilometer diep, de diepste boring in de Aarde moest na circa 13 km worden beëindigd omdat de hitte te groot werd en de boorkop begon te smelten. De diepste plek in de Aarde waar gemeten wordt is een boorgat in Beieren van ruim 9 km diep. De afstand van 9 of 13 km is voor ons de hoogte waarop we vliegen, de afstand naar ons werk, de lengte van de dagelijkse files of de lengte van een rondje hardlopen. Als we die afstanden vergelijken met de straal van de Aarde van bijna 6400 km, dan moge het duidelijk zijn dat we in de huid van Moeder Aarde zijn blijven steken. De bergketens als de Himalaya of de troggen als de Marianatrog zijn dus rimpels op de huid van Moeder Aarde, waarop wij als mijten leven.

Hoewel het merendeel van de Aarde voor ons ontoegankelijk is, zijn de processen die zich daarbinnen afspelen zeer wezenlijk voor ons bestaan op onze planeet. Een van de belangrijkste processen zorgt er voor dat onze planeet een magnetisch veld heeft, dat ons beschermt tegen een te grote dosis kosmische straling en er voor zorgt dat we een atmosfeer behouden. Zonder die bescherming zou het leven op Aarde zoals we dat kennen niet mogelijk zijn. Het ontbreken van die bescherming tijdens ruimtereizen naar andere planeten is één van de grote obstakels voor dat soort vluchten.

Andere effecten van de processen in het binnenste veroorzaken verplaatsing van continenten, met soms desastreuze gevolgen als aardbevingen, vulkaanuitbarstingen en vloedgolven. De globale mechanismen van deze processen denken we te kennen maar de drijvende krachten achter deze bronnen zijn warmtebronnen waarvan we de precieze verdeling, aard en omvang niet kennen.

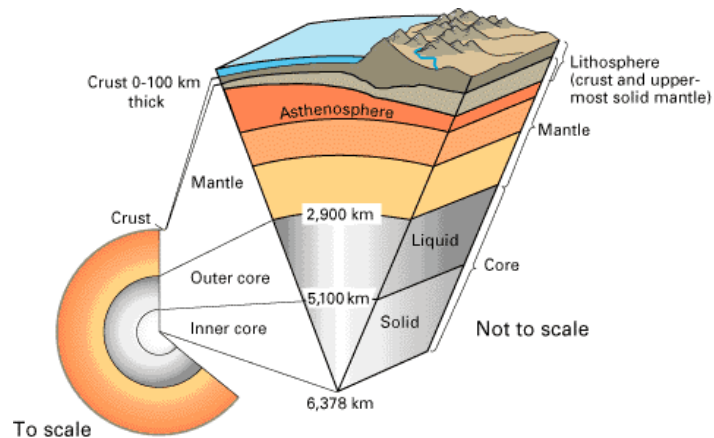
Hoofdstuk

Warmtebronnen

Het beeld dat we van het binnenste van de Aarde hebben is een soort toverbal, een gelaagde bolsymmetrische structuur (zie figuur 1). Dit beeld is vooral afkomstig uit de metingen van aardbevingen over de aarde. De aardbevingsgolven worden bij overgangen van lagen met andere dichtheid afgebogen en de loopsnelheid van de golven verandert eveneens. Uit de afbuiging en de aankomsttijd van de aardbevingsgolven hebben geofysici een beeld geconstrueerd van lagen. Het gedeelte waarop wij leven heet de korst en bestaat uit een laag van maximaal 100 km relatief licht materiaal (graniet). De korst 'drijft' op de mantel zoals een ijsberg op zee: de dikte hangt af van de hoogte van de korst om ruwweg te voldoen aan de wet van Archimedes. Dus onder gebergten zoals de Alpen, de Andes en Himalayas is de korst aanzienlijk dikker dan onder de Sahara of het Amazonegebied.

De mantel bestaat uit dichtere materialen zoals basalt en is circa 2900 km dik. Uit de seismische golven leidt men af dat er in de mantel nog een aantal subschillen te onderscheiden is. In de diepste delen van de Aarde bevindt zich de kern, waarvan men vermoedt dat die voornamelijk uit ijzer en nikkel bestaat. (Seismische) golven trillen in vaste stoffen zowel in de lengte als in de dwarsrichting. In een vloeistof of een gas zitten moleculen niet in een vaste structuur die tegenwicht biedt (water kun je niet scheuren) en treden alleen lengtegolven op. Het ontbreken van dwarsgolven voor een deel van de kern was de basis om een eeuw geleden te concluderen dat de kern een vloeibaar gedeelte heeft. Het allerbinnenste van de kern is weer vast.

Naarmate we dieper in de Aarde afdalen, stijgen de druk en de temperatuur. Binnen in de Aarde schat men dat er temperaturen van 5000-6000 °C heersen, hoger dan aan het oppervlak van de Zon. De drukken in het centrum zijn meer dan een miljoen atmosfeer. Deze combinatie van drukken en temperatuur zijn in het laboratorium niet op macroscopische schaal gelijktijdig te verwezenlijken. Daarom weet men niet met zekerheid hoe stoffen zich precies bij die omstandigheden gedragen.



figuur 1. Schematisch beeld van het binnenste van de Aarde, gebaseerd op het gedrag van seismische golven

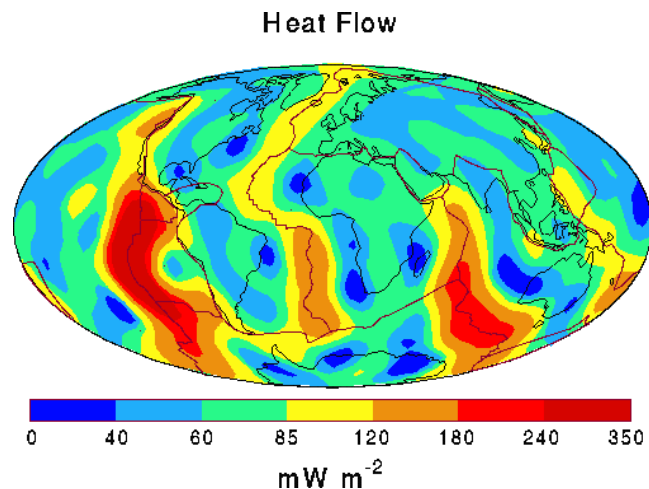
De vloeibare kern speelt een belangrijke rol voor het leven aan de oppervlakte van onze planeet. Bij de hoge temperaturen en drukken is de vloeistof voor een groot deel geïoniseerd en dus geladen. Door de convectie van de vloeistof ontstaan elektrische

stromen, die op hun beurt een magneetveld oproepen: het aardmagnetisch veld. De kern is een grote dynamo. Het aardmagnetisch veld zorgt er voor dat we ons aan het aardoppervlak kunnen oriënteren met een kompas. Het aardmagnetisch veld vangt ook een deel in van de door kosmische straling geproduceerde deeltjes. Die worden met een spiraalvormige baan naar de magnetische Noord- en Zuidpool afgevoerd en kunnen daar als zij in de atmosfeer komen aanleiding geven tot het verschijnsel dat wij hier kennen als noorderlicht. Het afbuigen en invangen van kosmische deeltjes zorgt er voor dat de zonnwind de atmosfeer niet opwarmt en wegblaast.

Als er geen energiebronnen zouden zijn om de convectie in de kern op gang te houden, zouden de convectiestromen en daarmee de elektrische stromen stoppen en zou er geen magnetisch veld meer zijn. Het ontbreken van een magneetveld voor Mars kan er op wijzen dat Mars geen vloeibare kern meer heeft.

Hoewel de mantel als vast wordt gekenschetst is zij niet star. In de mantel treden langzame convectiestromen op die aan het aardoppervlak waarneembaar zijn. In het midden van de Atlantische, Indische en Stille Oceaan komt mantelmateriaal naar boven en vloeit met een snelheid van enkele cm per jaar naar twee kanten weg. De magnetische mineralen in het vloeibare mantelmateriaal stollen. De magneetjes krijgen daarbij een oriëntatie overeenkomstig de heersende richting en sterkte van het aardmagnetisch veld. Deze mineralen leveren dus een tijdbeeld van het aardmagnetisch veld. Uit dit tijdbeeld blijkt dat het aardmagnetisch veld niet altijd even sterk is, in de tijd van richting verandert en zelfs af en toe 'omklapt'.

Als op een plaats materiaal aan het oppervlak komt, moet op een andere plaats het materiaal weer naar het binnenste gaan: subductie genoemd. Dit gebeurt bijvoorbeeld aan de randen van de continenten. In bijvoorbeeld Zuid- en Noord-Amerika of Indonesië leidt de subductie van de oceaانبodem tot een hele reeks vulkanen. Dat de subductie soms met horten en stoten gaat merken we aan aardbevingen, af en toe gepaard gaande met vloedgolven. De continenten op Aarde drijven dus op de bewegende manteldelen en worden zo meegenomen. Voorbeelden zijn Afrika dat tegen Europa en India dat tegen China aangedrukt wordt. Waar continenten tegen elkaar aangedrukt worden, ontstaan rimpels in de huid in de vorm van gebergten. Op plekken waar de oceaانبodem onder een ander



Figuur 2. Warmte-uitstroom uit de Aarde. (Afkomstig van Pollack, H.N., Hurter, S.J., and Johnson, J.R., Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set, *Reviews of Geophysics* **31**(3), 267-280, 1993)

stuk oceaانبodem duikt, vinden we de troggen. Ook hier geldt dat om de bewegingen van oceaانبodems en continenten in gang te houden, energiebronnen nodig zijn.

Diep in de Aarde moeten zich dus warmtebronnen bevinden, waarvan we de effecten aan het aardoppervlak waarnemen. In de laatste decennia is op ruim 20.000 plekken over het aardoppervlak de warmte-uitstroom uit de Aarde gemeten. Het beeld dat daaruit voorkomt, vindt u in figuur 2. Als men de waarden van alle punten over het oppervlak integreert, bedraagt de totale warmte-uitstroom ongeveer 45 TW (1TW= 1miljoen MW). Dit komt overeen met de warmteproductie van 15000 elektriciteitscentrales van 1000MW_e. Zoveel vermogen staat er op de gehele wereld niet opgesteld.

In de figuur vallen onmiddellijk een paar merkwaardigheden op. Zo zien we dat er ongeveer een factor 20 verschil zit tussen de ‘koudste’ en de ‘warmste’ plekken. Verder vinden we de warmste en de meest koude plekken op een band op het zuidelijk halfrond. De warme plekken liggen midden in de Atlantische, Indische en Stille Oceaan de koude plekken onder of bij de continenten. Verder valt op dat de twee “zeer warme” rode gebieden en de twee “warme” bruine gebieden ongeveer 180° uit elkaar en onderling 90° zijn verschoven. Voor fysici is dit een quadrupoolpatroon.

De warmte-uitstoot uit de Aarde is een duizendste van de inkomende zonne-energiestroom. Aan het aard- en oceaanooppervlak is de warmte-uitstoot relatief slechts een schijntje van de energietoevoer via de zonnestraling, maar voor de oceaانبodem is dat anders. Het warme gebied in de Stille Oceaan wordt als een mogelijke bron genoemd van El Niño, doordat bellen warm water vanaf de bodem opstijgen.

Volgens mij houden het warmtepatroon en de ligging en beweging van de continenten verband met elkaar. Ten zuiden van de band met maxima ligt alleen Antarctica, dat ook niet zuidelijker kan. De andere continenten worden naar het noorden gedreven waarbij het Indiase subcontinent extra hard geduwd wordt. De vraag voor mij is: wat zijn de bronnen die deze circulaties in stand houden? Bevinden deze bronnen zich altijd op dezelfde plaats of verplaatsen ze zich? Produceren ze alle bij elkaar het vermogen van 45TW?

Radioactiviteit

In de Aarde bevinden zich sinds het ontstaan radioactieve elementen. Van de oorspronkelijke verzameling zijn alleen die elementen overgebleven, die een halveringstijd hebben die van dezelfde orde van grootte of groter is dan de leeftijd van de Aarde. De drie belangrijkste zijn ⁴⁰K, en de vervalseries van ²³²Th en ²³⁸U. Radioactiviteit is een proces waarbij energie vrijkomt die uiteindelijk in warmte wordt omgezet. In de onderstaande tabel staan de belangrijkste eigenschappen van die elementen weergegeven.

tabel 1: Maximum antineutrino energie en warmteproductie voor natuurlijke vervalprocessen

vervalmode	E _{max} (MeV)	warmte(W/kg)
²³⁸ U → ²⁰⁶ Pb + 8 ⁴ He + 6e + 6ν ⁻	3.26	0.95·10 ⁻⁴
²³² Th → ²⁰⁸ Pb + 6 ⁴ He + 4e + 4ν ⁻	2.25	0.27·10 ⁻⁴

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \bar{\nu}$	1.31	$0.38 \cdot 10^{-8}$
--	------	----------------------

De tabel geeft achtereenvolgens weer: de manier waarop de elementen vervallen, de maximale energie die voor een antineutrino, $\bar{\nu}$, beschikbaar is, en de warmteproductie per kilogram. Als voorbeeld zien we dat ^{238}U (uraan-238) uiteindelijk naar ^{206}Pb (lood-206) vervalt onder uitzending van 8 kernen helium-4, 6 elektronen en 6 antineutrino's. Uit de tabel komt op een duidelijke manier naar voren dat de warmteproductie van uraan-238 rechtstreeks is gekoppeld aan de hoeveelheid uitgezonden antineutrino's. Verder zien we dat de energie van de antineutrino's karakteristiek is voor het radioactieve element.

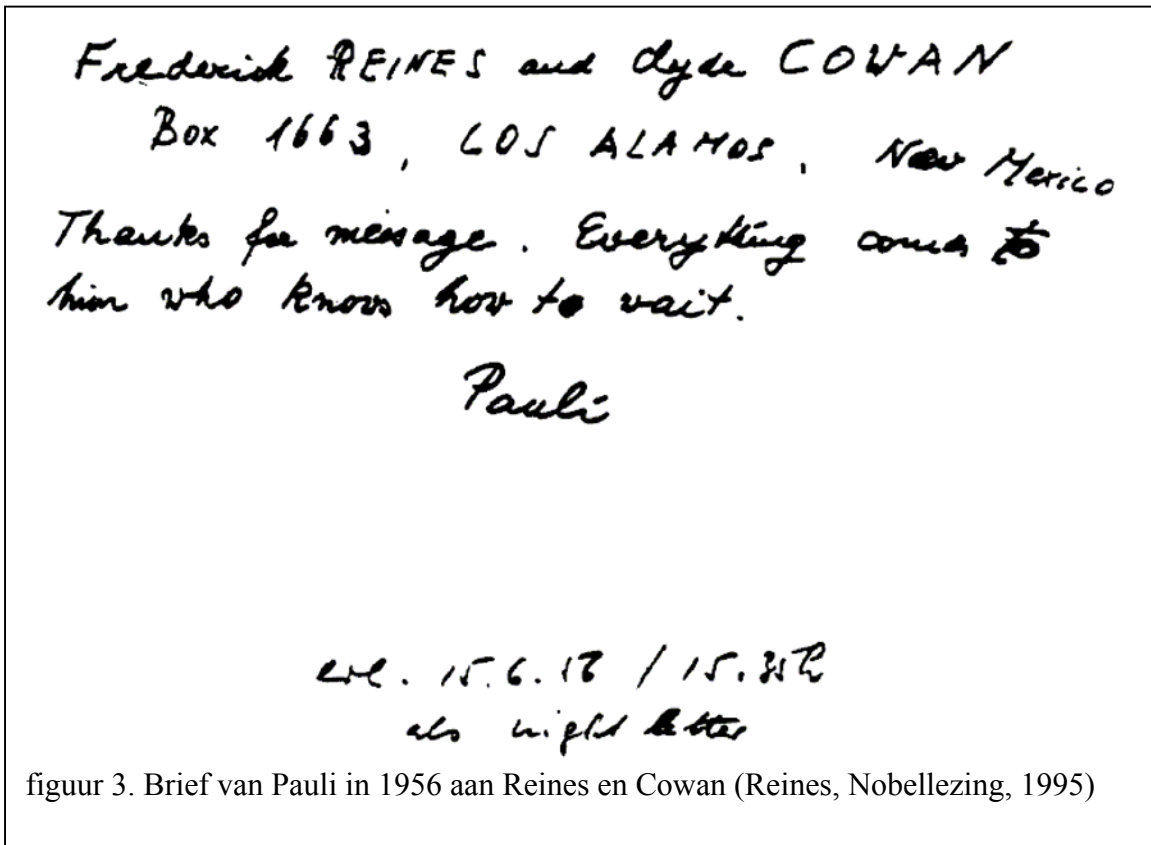
Antineutrino's zijn elementaire deeltjes, met een zeer kleine massa, die praktisch zonder enige interactie over een recht pad door de Aarde kunnen reizen. Op grond van schattingen over de radioactiviteit in de Aarde mogen we verwachten dat er zo'n miljoen antineutrino's per seconde door een vingernagel gaan. Als we in staat zijn om antineutrino's te meten en te bepalen van waar ze uit het binnenste van de Aarde komen, kunnen we een deel van het raadsel van de warmtebronnen oplossen.

Het meten van antineutrino's en neutrino's is een vaardigheid waarover we pas sinds een paar decennia beschikken. In Japan, Canada, Italië en bij de Zuidpool staan detectoropstellingen met een groot volume, die vooral zijn gebouwd om bij veelal hoge energie de eigenschappen van (anti)neutrino's te meten. Met die detectoren kan goed gemeten worden dat er antineutrino's zijn, maar het is niet mogelijk om vast te stellen uit welke richting ze komen.

Antineutrino's

Een lange tijd is het radioactief β -verval een raadsel geweest. Bij het verval worden elektronen uitgezonden, die in plaats van de verwachte precieze energie een continue verdeling hebben. Het leidde er rond 1930 zelfs toe dat de grote Deense kernfysicus Niels Bohr suggereerde dat de alom bekende wetten van behoud van impuls en energie niet voor dit vervalproces zouden gelden. In 1934 postuleerde Wolfgang Pauli dat er in het β -verval nog een deeltje wordt uitgezonden dat niet werd gedetecteerd: het latere antineutrino. Al snel kwam men er achter dat als dit postulaat waar zou zijn, de kans om het deeltje waar te nemen uiterst miniem was. Dat deed Pauli verzuchten: "Ik heb iets vreselijks gedaan. Ik heb een deeltje gepostuleerd dat niet gemeten kan worden."

Na de Tweede Wereldoorlog hebben de Amerikanen Reines en Cowan, uitgedaagd door de gedachte dat je (anti)neutrino's toch niet kunt meten, een onderzoek gestart waarbij uiteindelijk in 1956 experimenteel het antineutrino werd bevestigd. Zij stelden Pauli van het nieuws op de hoogte, die het briefje in figuur 3 schreef; een briefje dat overigens nooit is aangekomen en rond 1986 door een van Pauli's studenten werd gevonden. Reines, Cowan was reeds overleden, ontving in 1995 voor deze experimentele bevestiging de Nobelprijs voor Natuurkunde. Niet alleen Pauli maar ook Reines heeft dus moeten wachten.



figuur 3. Brief van Pauli in 1956 aan Reines en Cowan (Reines, Nobellezing, 1995)

(Anti)neutrino's zijn nog steeds spookdeeltjes. Zij komen ieder in drie soorten (de zogenaamde smaken) voor en kunnen tijdens hun reis van smaak veranderen. In zijn Nobellezing beschrijft Reines deze smaakverandering als een hond die van huis weggaat, onderweg een tijdje een kat is en bij thuiskomst weer hond kan zijn. Als uw hond naar vis stinkt, moet u daar maar eens aan denken. Ook deze smaakverandering heeft lange tijd voor verwarring gezorgd omdat het aantal neutrino's van de Zon slechts een derde was van het berekende aantal. Het verschijnsel bleek uiteindelijk met deze smaakverandering te maken te hebben waarbij het ene type neutrino gelijkmatig over de drie typen werd verdeeld. In 2002 ontving Davis voor deze ontdekking de Nobelprijs voor Natuurkunde.

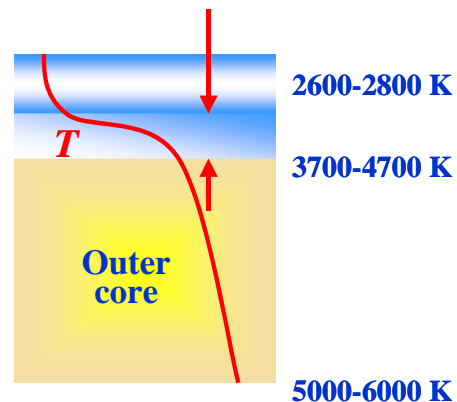
Het feit dat de smaakverandering optreedt, is het bewijs dat het neutrino een massa heeft. De massa is zeer klein en nog niet precies bekend. Er is nog veel meer spannends over neutrino's te vertellen, maar we raken van ons pad af.

Hoofdstuk

Earth Antineutrino Tomography Programme (EARTH).

De bestemming van onze reis in de Aarde worden dus de warmtebronnen en ons hulpmiddel om ze op te sporen worden antineutrino's. We weten dat er geen reisfolders zijn van onze bestemming en dat we zelf ons pad erheen zullen moeten effenen. Ook zullen we een richting moeten bepalen waarin we gaan afreizen en zullen we een expeditieteam van terranauten moeten samenstellen. Onderweg zullen we dan wel zien hoe we onze koers zullen moeten bijstellen en welke hulpmiddelen we nog zullen moeten vervaardigen tijdens onze reis. De onzekerheid is groot, ook over het bereiken van ons doel. Sinds ongeveer een jaar zijn we nu onderweg om een beeld van het inwendige van de Aarde te gaan maken en begint een idee om dit doel te bereiken zich uit te kristalliseren met het programma EARTH.

Om een beeld van het inwendige van een mens te maken wordt in de geneeskunde al geruime tijd een methode gebruikt waarbij een radioactieve stof in het lichaam wordt gebracht, waarna met detectoren in diverse posities rond de patiënt een beeld van een orgaan wordt gemaakt. Deze methode wordt onder andere gebruikt in een PET-scanner. Het woord PET staat hier voor Positron Emission Tomography. Tomo komt van het Griekse woord *tomē* dat een snede betekent en PET staat dus voor een quasi 3D-beeld bepaald uit doorsneden verkregen door de uitgezonden positronen. Positronen zijn de antideeltjes van elektronen en kunnen in lekentaal het best worden benaderd door elektronen met een positieve lading. Ook in de Aardwetenschappen wordt tomografie bedreven. Hierbij worden aan de hand van aardbevingsgolven bewegingen van stukken korst en mantel zichtbaar gemaakt.



figuur 4. Geschatte temperatuurverloop nabij de grens van mantel en kern

In ons programma EARTH willen we een tomografisch 3D-beeld van de radiogene warmtebronnen maken door de uitgezonden antineutrino's te meten. Om zo'n beeld te maken moeten we rond de Aarde detectoren gaan opstellen die in diverse richtingen de Aarde inkijken. In analogie met de instrumenten waarmee we de ruimte inkijken noemen we een dergelijk stelsel van detectoren een antenne. Het verschil is dat deze antenne naar binnen kijkt. We denken dat we ongeveer tien van deze antennes nodig hebben om een scherp beeld van de bronnen in de Aarde te kunnen maken. We zullen het probleem aanpakken op de manier waarop natuurkundigen zijn opgeleid: het opknippen van een complex probleem in een groot aantal, relatief eenvoudige deelproblemen die stuk voor stuk worden opgelost en daarna worden samengebracht tot een oplossing van het grote en complexe probleem.

Hoe goed moet een dergelijk tomografisch 3D-beeld uiteindelijk worden? Als we teruggaan naar ons toverballenbeeld van de Aarde (figuur 1) dan vinden we in de literatuur dat zich op de rand van de mantel en de vloeibare kern (diepte ~2900 km) een

temperatuursprong van zo'n 1000 tot 2000 K voordoet over een afstand van enkele honderden kilometers (figuur 4). Als we een hoekresolutie van 3° zouden weten te bereiken, dan zien we ruwweg bronnen met een diameter van ongeveer 150 km als we recht naar beneden kijken van de kant waar de antenne zich het dichtst bij de bron bevindt en 450 km als we er het verst vanaf zijn. Zowel in de medische als in de aardwetenschappen zijn rekentechnieken ontwikkeld om uit de respons van de diverse detectoren het precieze beeld van het binnenste te reconstrueren. Van diezelfde technieken zullen we gebruik gaan maken. In samenwerking met de faculteit Aardwetenschappen in Utrecht gaan we binnenkort van een aantal hypothetische warmtebronnen de antineutrinoflux berekenen voor een aantal antennes. Uit dat beeld proberen we de bronnen weer terug te rekenen. Op die manier krijgen we een beter inzicht in de scherpte van ons beeld als functie van de antenne-eigenschappen.

Volgens de Amerikaanse fysicus Marvin Herndon bevindt zich in het binnenste van de Aarde een natuurlijke kernreactor met een diameter van 8 km. Een kernreactor zendt antineutrino's uit met een beduidend hogere energie (tot ongeveer 10 MeV) dan onze natuurlijke radionucliden. Die natuurlijke kernreactor zien we met onze hoekresolutie van 3° als een voorwerp van 300 km diameter, maar uit de sterkte van de bron kunnen we de echte diameter wel terugrekenen. Een voorwerp met een diameter van 300 km is natuurlijk al een aanwijzing waar een van de mogelijke doelen van onze zoektocht zich binnen de vaste kern met een diameter van circa 2500 km bevindt. Kortom, onze antennes kunnen ons al aardig wat vertellen over de verdeling van de warmtebronnen en over hun aard.

Lukt het ons om die doelstelling te bereiken? Zoals gezegd denken we over de Aarde ongeveer tien antennes te plaatsen. Als ieder van die antennes uit zo'n dertig armen bestaat die ieder met ~~een hoge~~ hoekresolutie van circa 15° ~~halen omspannen~~, bedekken we met iedere antenne ruim een halve bol. Dat wil zeggen dat voor een eerste antenne de hoekresolutie van iedere arm ook ongeveer 15° moet zijn. Een veel betere hoekresolutie heeft geen zin omdat anders gaten vallen in ons beeld. Met de tien antennes krijgen we dan onze 3° resolutie.

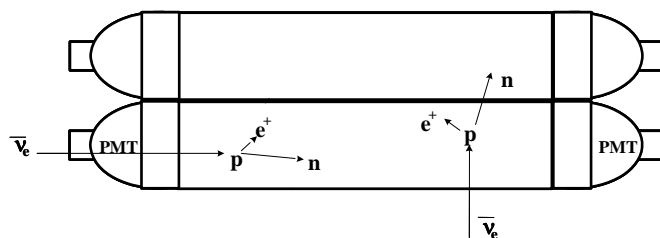
Een andere voor de hand liggende vraag is: antineutrino's hebben nauwelijks wisselwerking met materie, kun je dan wel goed meten? Om daar een idee van te krijgen hebben we een paar rekensommetjes gemaakt voor een situatie waarbij we veronderstellen dat er twee bronnen van radiogene warmte zijn. Eén die bestaat uit de gehele mantel waarin de radionucliden homogeen verdeeld zijn en een warmte produceren van 20TW en een andere sterk gelokaliseerde bron van 5TW die zich bevindt op de grens van mantel en vloeibare kern in de laag met de grote temperatuursprong. Die bron denken we ons in op 30° Z en 69° W, onder Argentinië en op dezelfde lengtegraad als Curaçao (12° N en 69° W). Op Curaçao plaatsen we onze antenne met vier miljoen kilo aan detectiemateriaal met een gevoeligheid van 50%. De rekensommetjes leren dan dat we per jaar ongeveer 200 antineutrino's (gebeurtenissen) meten afkomstig van de homogene bron en 80 gebeurtenissen afkomstig van de lokale bron mogen verwachten. Als we daarbij de bijdrage van de aardkorst (Andes) en van de kernreactoren in de VS meenemen, krijgen we in onze antenne ongeveer één echte gebeurtenis per dag. Met een

zodanige telsnelheid heb je in een paar jaar voldoende statistiek om de bron te lokaliseren en met meerdere antennes over de wereld kan je zelfs nog zwakkere lokale bronnen ($\sim 1\text{TW}$) in een jaar of tien in kaart brengen. Een voorwaarde is natuurlijk wel dat je een achtergrond hebt die nog een factor tien lager is dan je meetelsnelheid. Deze achtergrond wordt voor een deel veroorzaakt door de kosmische straling en voor een deel door de natuurlijke straling uit het gesteente en de gebruikte materialen.

Waar bestaat zo'n antennearm uit en hoe krijgen we voldoende richtingsgevoeligheid? Bij het ontwerpen van de antenne moeten we niet vergeten dat antineutrino's nauwelijks een wisselwerking hebben met materie en dat we om iets te kunnen waarnemen een volume moeten hebben dat minstens zo groot is als dat van de bestaande detectoren zonder richtingsgevoeligheid. Die randvoorwaarde betekent dat we enerzijds heel gevoelig moeten zijn voor de richting, maar aan de andere kant geen gedetecteerde antineutrino's mogen 'weggooien'.

Als een antineutrino binnen onze detectoren een reactie aangaat, wordt het ingevangen door een waterstofkern (proton) en vormen zich een positron en een neutron. Het positron is bijna 2000 keer lichter dan het neutron en daarom krijgen we ongeveer het beeld van een waterstraal die op een bal gericht wordt. De lichtere druppels spatten alle kanten op en de bal gaat langzaam verder in de richting waarin de straal binnenkomt. Zo gebeurt dat ook in de reactie: de positronen gaan bijna alle kanten even sterk op en het neutron wordt nagenoeg in de richting uitgezonden waarlangs het antineutrino binnenkomt. Het neutron draagt dus de richtingsgevoeligheid met zich mee. De energie van het antineutrino kunnen we aan de positronen aflezen. De positronen worden onmiddellijk in onze detector afgeremd en geven daarbij een lichtflits af waarvan de grootte overeenkomt met de energie. Het neutron begint zijn tocht door de materie tot het ingevangen wordt. Iedere keer botst het met een waterstofkern en verliest iets van zijn oorspronkelijke richting. Dat verlies wordt steeds groter naarmate het neutron meer botst en zijn route wordt een dronkemanspad als het dezelfde energie heeft als de thermische energie van kernen waarmee het botst. Alle informatie over de oorspronkelijke richting is verloren gegaan.

We kunnen dit verlies aan informatie voorkomen door aan het detectormateriaal of ^6Li of ^{10}B toe te voegen. Die stoffen kunnen al neutronen invangen voor de neutronen dronken zijn. Het voordeel is dat bij dat invangen alfadeeltjes worden gevormd die binnen een micrometer worden gestopt en daarbij een lichtflits afgeven. Dat invangen gebeurt binnen een paar miljoenste seconde.



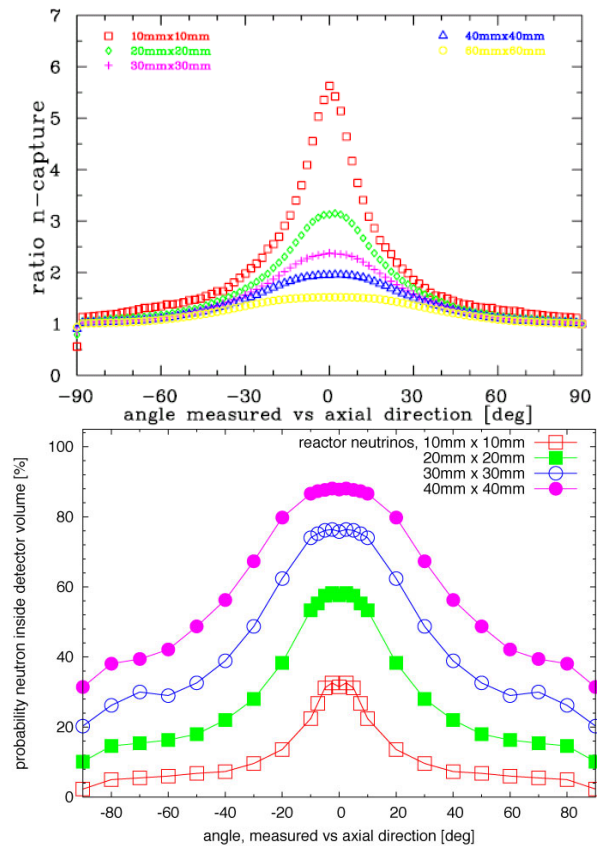
figuur 5. Schematische voorstelling van de richtingsgevoeligheid van een antineutrino detector module

We hebben nu een aantal vliegen in een keer gevangen: het neutron behoudt zijn richting en we krijgen twee signalen binnen een paar miljoensten van een seconde. Signalen die niet binnen die tijd binnenkomen zijn valse signalen en we hebben onze gevoeligheid

voor die signalen met een factor miljoen gereduceerd. In een geschikt detectormateriaal verschillen de pulsen van het positron en het neutron in vorm. We kunnen het aantal valse signalen dus nog verder terugdringen door de pulsvormen te controleren. Met alle onderdrukkingsmogelijkheden hopen we een onderdrukking van een factor miljard te halen. Dat het terugdringen van die valse signalen zo belangrijk is, kunt u afleiden uit het feit dat we per kiloton detectiemateriaal ongeveer 1000 valse gebeurtenissen per seconde verwachten. Met de factor miljard onderdrukking komt dat er op neer dat onze antenne per jaar zo'n 10 valse signalen zal detecteren.

Eerst laat ik u zien dat het inderdaad mogelijk is om richtingsgevoeligheid te krijgen. Figuur 5 geeft schematisch een tweetal detectoren weer met twee mogelijke manieren waarop het antineutrino in een van de detectoren binnenkomt: langs de as of loodrecht er op. Deze detectoren maken deel uit van een detectormodule die uit meerdere detectoren bestaat. In figuur 5 zijn de PMT's instrumenten die lichtflitsen in elektrische pulsen omzetten. Van het antineutrino dat langs de as binnenkomt worden zowel het positron als het neutron binnen dezelfde detector waargenomen, van het antineutrino dat dwars op de detector binnenkomt, vliegt het neutron uit die detector en zal dus een signaal in zowel de eerste als de naastliggende detector geven. Op deze manier wordt dat antineutrino, afhankelijk van de inkomende richting in of één of in twee detectoren waargenomen. De afstand die het neutron aflegt voor het een signaal geeft is maar enkele centimeters en dus mag de diameter van de detector ook niet veel groter zijn.

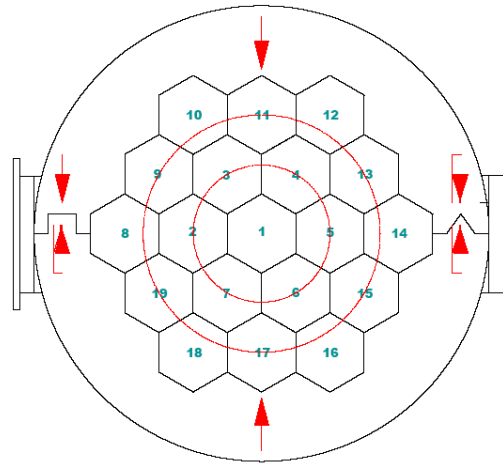
Als we alleen één detector zouden gebruiken, krijgen we met die ene detector wel een heel goede richtingsgevoeligheid in de lengterichting (zie bovenpaneel van figuur 6), maar verliezen we veel goede signalen (zie onderpaneel figuur 6) waarbij de neutronen uit de detector gaan en in een andere eenheid terechtkomen. Onze detectormodule bestaat dan ook uit een samengestelde configuratie die we schematisch in figuur 7 hebben weergegeven voor detectoren met een honingraatdoorsnede. Als we het schema van



Figuur 6. De waarschijnlijkheid om een neutron in een antineutrino-detector te meten als functie van de doorsnede. Boven de verhouding axiaal/radiaal en onder in absolute termen

figuur 5 nog even terugdenken dan zien we dat bij een radiaal inkomend antineutrino het neutron in een van de zes omliggende detectoren zal worden gedetecteerd. Dus ook voor de radiale richting hebben we richtingsgevoeligheid. Een module zoals deze heeft nog een groot aantal voordelen waarvan we gebruik moeten maken om onze hoge eisen voor de achtergrondonderdrukking te kunnen realiseren.

De resultaten in figuur 6 geven aan dat we detectoren met een kleine doorsnede nodig hebben. Om toch voldoende volume aan materiaal te krijgen, hebben we er heel veel nodig. Dat kan niet worden gerealiseerd met de huidige standaardtechnologie en vereist een ontwikkeling van nieuwe technologieën. Ik zal u niet vermoeien door uit te leggen hoe we dit denken te kunnen oplossen. We hebben thans een consortium van voor een deel noordelijke industrieën en samenwerking met Zuidafrikaanse fysici waarmee we zowel technologisch als fysisch het probleem aanpakken. Het vooruitzicht is dat we dit varkentje kunnen wassen. Met hulp van het Technologie Centrum Noord Nederland (TCNN) zoeken we in Nederland en in de Europese Unie naar fondsen om die oplossingen te realiseren en te testen.

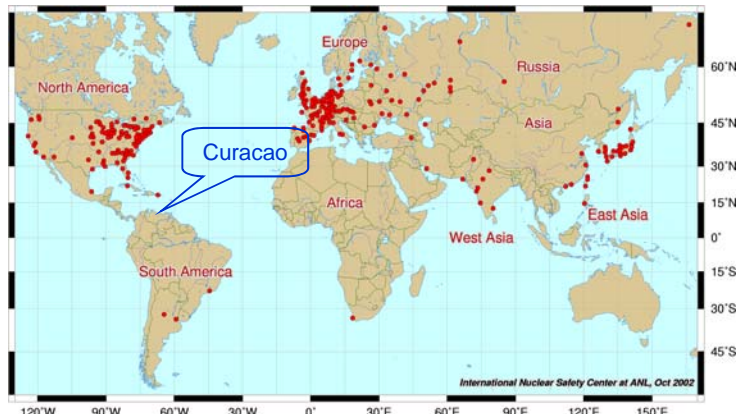


Figuur 7. Schematische doorsnede van een detectormodule met detectoren met een honingraatstructuur

Voor onze antenne moeten we de grond in, niet om dichterbij de warmtebronnen te komen, maar om onze detectoren af te schermen tegen de deeltjes van de kosmische straling. Verder willen we niet gestoord worden door onze omgeving en dat betekent dat we niet dicht bij kerncentrales of dikke stukken aardkroon met veel kalium, uraan en thorium willen zijn. In Europa lukt dat dus niet, maar Curaçao is daarvoor een ideale plaats binnen ons koninkrijk. Het bestaat uit stralingsarm gesteente en ligt ver weg van de Amerikaanse kerncentrales (zie figuur 8). Aan

geologische publicaties hebben we nu een locatie ontleend, die geschikt lijkt.

Hoe diep we de grond in moeten hangt af van de mate waarin we de kosmische straling kunnen en moeten onderdrukken. Als het lukt om slechts een laag gesteente van ca. 50 m



figuur 8. Wereldkaart met kerncentrales. De centrales op Puerto Rico en Cuba zijn thans niet meer in gebruik

boven onze detectoren te hebben, kunnen we ons antenneconcept vervangen door een ondergronds laboratorium. Het antwoord hierop wordt in eerste instantie gegeven door de resultaten van de detectorontwikkeling. De uitvoerbaarheid is vooral een kwestie van kostenafweging waarin aanleg en lange toegankelijkheid tegen elkaar worden afgewogen. Een ondergronds laboratorium heeft vele, grote voordelen boven een systeem van ontoegankelijke gangen. Wellicht het meest attractief, naast de toegankelijkheid, is de mogelijkheid dat de detectormodules in een ondergronds laboratorium zo kunnen worden opgesteld dat ze achteraf gericht kunnen worden op een bepaalde bron. Een beweegbare en focusseerbare antenne in plaats van een starre.

Aan de hand van seismische gegevens en het maken van proefboringen zullen we nagaan of we een antenne ook kunnen realiseren. Met de autoriteiten en bedrijven op Curaçao exploreren we de mogelijkheden op het eiland. Met de autoriteiten in Nederland en Curaçao zoeken we ook naar de benodigde gelden.

Het moge duidelijk zijn dat we in Groningen begonnen zijn aan een zeer uitdagende taak. In haar julinummer van dit jaar noemt Science de werking van het binnenste van de Aarde een van de vijftientig meest uitdagende wetenschappelijke vragen voor de komende vijftientig jaar. In het nummer van 28 juli, 2005 van Nature wordt het bestaan van geoneutrino's door KamLAND bevestigd. Als het ons lukt het project EARTH te verwezenlijken en de komende tientallen jaren het beeld van warmtebronnen in het binnenste van de Aarde zich zal ontvouwen, zal Groningen zich met dit project in de kijker hebben geplaatst. Niet alleen vanwege de wetenschappelijke prestaties maar misschien nog wel meer door de technologische en industriële spin-off die EARTH met zich zal meebrengen. Voor de Antillen en Curaçao betekent een antenne niet alleen internationale bekendheid maar, nog belangrijker, hoogwaardige duurzame werkgelegenheid en mogelijke spin-off van geothermische energie. Om die werkgelegenheid op tijd te kunnen invullen zijn we begonnen om scholieren nu al voor de bètawetenschappen te interesseren.

Het is daarbij een enorme steun dat zowel de regering van de Nederlandse Antillen, de Rijksuniversiteit Groningen en de Raad van Advies van EARTH ons in deze uitdaging steunen en wegen openen om onze doelstellingen te kunnen bereiken. Om het project goed te managen en de risico's goed te kunnen beheersen, hebben de Rijksuniversiteit Groningen, de Stichting ASTRON en de Stichting Jade, de Stichting EARTH opgericht. Die stichting heeft tot doel de wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen te bevorderen en in stand te houden, die kunnen leiden tot het in kaart brengen van de radiogene warmtebronnen in het inwendige van de Aarde door het detecteren van antineutrino's.

Hoofdstuk

Technologische ontwikkelingen

Hoewel de gevraagde richtingsgevoeligheid in principe haalbaar is, is de technologische realisering niet eenvoudig. De samengestelde detector bestaat uit zeer veel kleine detectoreenheden die aan beide kanten dienen te worden uitgelezen. De standaardmethode om dit met fotomultiplicatorbuizen (PMT's) te doen wordt voor een ondergrondse antenne om meerdere redenen niet haalbaar. Er zullen dus andere fotonconverters moeten worden ontwikkeld (Avalanche Photo Diodes, Multi Channel Plates, of misschien zelfs wel fibertechnologie met CCD-achtige uitlezing). De uitlezing zal in eerste instantie lijken op die welke in de medische beeldvorming (PET) wordt gebruikt, maar onze eisen zijn hoger en het is te verwachten dat de medische afbeeldingstechnologie op den duur van onze ontwikkeling gebruik kan maken.

Een soortgelijke ontwikkeling zien we nu al bij de fotonconverters waar een ontwikkeling samen met de industrie in gang gezet wordt en waarbij de industrie verwacht dat de ontwikkeling zal leiden tot een doorbraak in bijvoorbeeld de nachtkijkertechnologie. Ook bij de elektronica liggen de nodige uitdagingen, omdat uiteindelijk de elektronica op een laag-vermogen chip zal worden gebouwd waarbij analoge en digitale signaalverwerking worden gecombineerd. Ook hier zijn onze industriële partners er van overtuigd dat deze ontwikkeling in principe mogelijk is en onmiddellijk tot nieuwe toepassingen zal leiden.

Hoofdstuk

Marsroute

Het moge duidelijk zijn dat we met een ambitieus programma zijn gestart, waaraan naast hoge ambities ook risico's verbonden zijn. Dit is heel normaal want zonder risico's is innovatie niet mogelijk. In de aanpak van het programma proberen we echter wel de risico's hanteerbaar en acceptabel te houden. Het programma kent dan ook diverse fasen die ieder met een go/no-go beslissing afgesloten worden. Iedere fase zal al leiden tot producten met toepassingen elders. Na de positieve uitkomst van de computersimulaties ligt onze eerste go/no-go beslissing bij de 'Proof of Principle' test. Daarin zal voor het detectorontwikkelingdeel de demonstratie plaatsvinden van een proefmodule bij een kernreactor, als grote bron van antineutrino's. Bij die test nemen we al zoveel mogelijk nieuwe technologische ontwikkelingen mee, maar ook zonder die ontwikkelingen is met 'state of the art' technologiën een test mogelijk. Een geslaagde test brengt al een instrument waarmee kernreactoren continu kunnen worden gemonitord, zowel voor regulier gebruik als voor controle op de naleving van het Non-Proliferatie Verdrag.

De 3D-kartering van de warmtebronnen van de Aarde is een langetermijnprogramma, te vergelijken met een ruimteproject. De uitkomsten kunnen ons beeld over het functioneren van onze planeet drastisch veranderen en ons wellicht meer inzicht geven in het ontstaan van verschijnselen aan het oppervlak, zoals het aardmagnetisch veld, de verplaatsing van de continenten met hun soms dramatische gevolgen, fenomenen als El Niño en het patroon van de oceaanstromen.

De eerder gestelde vraag of de 5TW lokale bron ook door onze antennes goed gezien kan worden, is niet een zuiver academische vraag. Die vraag komt voort uit het feit dat de grote warmte-uitstroom ten westen van Zuid-Amerika zo'n 30% van de totale warmte-uitstroom voor zijn rekening neemt, dat er boven de Zuid-Atlantische Oceaan een gat in de Van Allen gordels (het magnetische schild van de Aarde) zit en dat in Zuidelijk Afrika het aardmagnetisch veld aan het oppervlak thans zeer snel verandert en op sommige plekken qua richting is omgekeerd. Zijn dit losstaande fenomenen of hebben we hier te maken met uitingen van eenzelfde proces? Met de geofysici van de Universiteit Utrecht en in Potsdam (D) proberen we hierin via modelberekeningen enig inzicht te krijgen. De 5TW bron in ons voorbeeld lag dus niet voor niets op 30° zuiderbreedte.

Terra incognita ligt dus vrij dicht onder onze voeten en het zal niet meevallen om haar binnen te komen. Maar is het niet een Chinees spreekwoord dat zegt dat als je 1000 mijl wil lopen, je een eerste stap moet zetten of kunnen we Pauli parafraseren door te zeggen dat je geduldig, lang en hard moet werken om iets moois te bereiken?

Hoofdstuk

Dankwoord

Dames en heren, het is niet gelukt om een afscheidscollege met een terugblik te geven. In dit college heb ik slechts kunnen aangeven dat er nog zeer veel boeiende vragen liggen. Om die aan te kunnen pakken moet je in een breed team werken van enthousiaste (dat komt in dit geval vanzelf) en zeer deskundige en toegewijde mensen. Verder moet je in een omgeving werken waar enerzijds kritisch naar ideeën wordt gekeken, maar anderzijds ruimte is om nieuwe zaken uit te proberen. Terugkijkend op de tweeëndertig jaar dat ik in Groningen heb mogen werken en de twaalf jaar die ik met de TU/e verbonden ben geweest, concludeer ik dat ik in zo'n omgeving heb mogen gedijen. Natuurlijk gingen zaken niet altijd van een leien dakje en natuurlijk was het af en toe zo dat het enthousiasme voor onze ideeën kwadratisch steeg met de afstand tot Groningen, maar uiteindelijk werd altijd een oplossing gevonden om door te gaan. Veel mensen ben ik daarvoor erkentelijk. Hen allen opnoemen zou een college apart vergen, vandaar dat ik me tot een enkeling beperk en chronologisch te werk ga.

Vanuit mijn eerste decennium bij het KVI bewaar ik goede herinneringen aan de samenwerking met Adriaan van der Woude, met wie ik ruim een jaar geleden ook nog een populair-wetenschappelijk boek over Radioactiviteit heb gepubliceerd.

In het midden van de jaren tachtig, nadat ik de 'fundamentele' kernfysica had verlaten, bood Rolf Siemssen mij aan een eigen groep te vormen op het gebied van toepassingen van kernfysische technieken. Vooral met Louis Put heb ik in die jaren aanvankelijk op het gebied van radon gewerkt, later volgden de radioactieve zanden van Ameland waar ik met Olaf Schuiling (Utrecht) en Hans Wiersma (Rijkswaterstaat) spannende tijden heb meegemaakt die leidden tot de Medusatechnologie, die nu door een aantal spin-off bedrijven wordt toegepast op bodemonderzoek en sinds kort in wegenbouw. De rol van Louis is later door Emiel van der Graaf overgenomen en met hem heb ik met veel genoegen verder gewerkt aan het transport van radon door poreuze media en de laatste jaren aan de toepassing van de Medusatechnologie in de wegenbouw. Uit de discussie tussen Emiel en mij is het idee van EARTH ontstaan, waaraan we nu met onder andere Ricky Smit in Zuid Afrika en Heinrich Wörtche op het KVI verder werken.

Henk Hagedoorn en Martien de Voigt hebben me naar Eindhoven gelokt, waar ik de radontechnologie heb kunnen uitbouwen in de richting van Bouwkunde. Ik hoop dat ook na het emeritaat van Nico Hendriks, dat binnenkort ingaat, die investering toch nog rendement zal opbrengen.

Zuid Afrika heb ik al even genoemd. De laatste tien jaar werk ik daar intensief samen met Robbie Lindsay aan de Universiteit van Weskaapland. Van oorsprong een theoretisch kernfysicus die nu met radon is besmet en ook de toepassingen van de Medusatechnologie voor typisch Zuidafrikaanse onderwerpen probeert te introduceren: wijn, goud en diamanten. Samen met Richard Newman van iThemba Labs is daar nu een kleine groep ontstaan met veel studenten en enkele promovendi. Mijn aanstelling als buitengewoon hoogleraar aan de Universiteit van Weskaapland loopt daar door en vanuit die hoedanigheid hoop ik aan de opbouw van Zuid Afrika te kunnen blijven meewerken. Het laatste jaar heeft het van de grond krijgen van het EARTH programma veel tijd en energie gekost. Een dergelijk project krijg je niet van de grond als je geen mensen rond je hebt, die je in je streven met advies en daad steunen. Heel, heel veel steun heb ik daarbij gekregen van Harvey Butcher, Jacob Dekker en Henk Koopmans. Zij hebben hun nek

verder uitgestoken dan menige giraffe! Ik zal die steun in de komende tijd nog vaak nodig hebben.

Het moge duidelijk zijn dat al die activiteiten niet kunnen plaatsvinden zonder een krachtige ondersteuning en veel begrip van uit de huiselijke omgeving. Yteke, Axel, Astrid en Marianne zijn steeds kritisch geweest als het goed ging maar waren ook daar als de tegenstormen raasden. Zonder hen was ik me nu wellicht aan geraniums gaan wijden.

Ik heb gezegd.